

Kvantna neseparabilnost, misterij na granici znanstvene spoznaje

Roko Pešić¹

Uvod

Godine 2025. navršava se 90 godina od objave rada *Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?*² (Može li se kvantnomehanički opis fizičke stvarnosti smatrati potpunim?), poznatijeg po nazivu EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) paradoks, u američkom znanstvenom časopisu *Physical Review Letters* koji je napisao Einstein u suradnji s dvojicom mlađih kolega fizičara, Borisom Podolskim i Nathanom Rosenom. Einstein, koji je od utemeljenja kvantne teorije imao problema s prihvaćanjem njenog matematičkog, preciznije rečeno, probabilističkog formalizma, smislio je suptilni misaoni pokus (u čemu je bio nenadmašivi majstor) kojim je htio pokazati da je kvantna teorija nepotpuna i da bi ju trebalo usavršiti.

Naime, još u 17. stoljeću francuski filozof Rene Descartes i nizozemski astronom Christiaan Huygens postavili su hipotezu etera – fine, nevidljive bezmasene tvari elastičnih svojstava, kako bi objasnili širenje svjetlosti odnosno riješili konceptualni problem djelovanja na daljinu (lat. *actio in distantiam*) gravitacijske privlačne sile između tijela koju je uveo Newton. Razvoju, tada novog fizikalnog koncepta polja u 18. stoljeću, veliki doprinos dao je naš Ruđer Bošković svojom teorijom jednostavnih, nedjeljivih, neprotežnih (točkastih) čestica tvari koje su izvori sila čije se djelovanje prostorom proteže na daljinu, a još kasnije, u 19. stoljeću, naročito engleski fizičar Michael Faraday svojim eksperimentalnim proučavanjem električnih i magnetskih pojava, te škotski teorijski fizičar James Clerk Maxwell koji je svojim jednadžbama postavio klasičnu teoriju elektromagnetizma. Pokazalo se da je i za opis električnih i magnetskih pojava, (uključujući svjetlost), potrebno uvesti pojam međudjelovanja koje bi se prostorom prenosilo putem nekog medija, lokalno, od točke do točke. Tako je hipotetički eter ponovno postao aktualan, sve do 1887. kada su američki fizičari Michelson i Morley izveli čuveni pokus³ kojim su definitivno dokazali da eter ne postoji, odnosno da se elektromagnetski valovi šire vakuumom uvijek istom brzinom svjetlosti, neovisno o sustavu opažača i brzini objekta koji emitira svjetlost, što je kasnije Einstein formulirao kao drugi postulat svoje specijalne teorije relativnosti (STR).

Ilustracija Einsteinovog misaonog pokusa

Zamislimo da u nekom nuklearnom događaju – npr. nuklearnom raspadu nestabilne atomske jezgre – nastanu dvije identične elementarne čestice (npr. dva fotona ili protona ili elektrona. . .) koji izlete iz jezgre u međusobno suprotnim smjerovima. Teoretski,

¹ Autor je s Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu; e-pošta: roko.pesic@gmail.com

² Albert Einstein, Boris Podolsky and Nathan Rosen, *Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?*, Phys. Rev. 47 (1935), pp. 777–780.

³ Vjera Lopac: *Leksikon fizike*, Školska knjiga, Zagreb, 2009., str. 151.

ako jedna od njih ima neko, nazovimo ga tako, svojstvo S , koje se može detektirati mjernim uređajem (npr. spin⁴, polarizacija⁵), tada druga ima komplementarno svojstvo anti- S . Kao primjer (ostvarenog) misaonog pokusa uzmimo da su elektroni priređeni u singletnom spinskom stanju⁶ s ukupnim spinom jednakim ničisti, čija ničistična vrijednost nakon raspada stanja, tj. izljetanja elektrona – prema zakonu očuvanja spina – mora ostati očuvana. Spinovi dvaju elektrona, u skladu s Paulijevim načelom isključenja⁷, moraju imati suprotne vrijednosti, dakle, ako jedan elektron ima spin $(1/2)\hbar$ ⁸, tada drugi elektron mora imati spin $(-1/2)\hbar$ i obrnuto. Koliko god bismo puta mjerili spinove elektrona, bez obzira na njihovu međusobnu udaljenost, uvijek ćemo dobiti takav identičan rezultat. Drušim riječima, dobit ćemo stopostotnu (anti)korelaciju u rezultatima po volji velikog broja mjerenja.

Navedimo još dva primjera sličnih događaja, realiziranih u pokusima: u jednome su anihilacijom elektrona i njegove antičestice pozitrona proizvedeni parovi suprotno polariziranih gama zraka (visokoenergetskih fotona), a u drugom su ubrzani protoni i vodikove jezgre formirali protonske parove u kratkoživućem singletnom spinskom stanju (analogno prije navedenom pokusu s elektronima). Mjerenjima orijentacija polarizacije obaju fotona odnosno vrijednosti spinova obaju protona dobiveni su međusobno komplementarni rezultati (npr. ako je kod jednog fotona opažena polarizacija bila horizontalna, kod drugog je bila vertikalna, i obrnuto).

Gdje je onda paradoks? On proizlazi iz temeljnih zakonitosti formalizma kvantne teorije. Naime, gibanje kvantnih objekata opisuje poznata Schrödingerova jednačba čije je rješenje valna funkcija koja opisuje stanje kvantnog objekta. O nekom mjerljivom svojstvu (tzv. opservabli) nekoga kvantnog objekta (čestice) ne možemo tvrditi ništa određeno, pa čak niti to da on uopće ima to svojstvo, sve dok ne izvršimo eksperimentalno opažanje i odredimo (izmjerimo) to svojstvo. U prije opisanom misaonom pokusu, ne možemo, dakle, a priori, reći koja od tih dviju čestica ima svojstvo S , a koja svojstvo anti- S .

Međutim, ako uspijemo “uhvatiti” jednu od tih dviju čestica i opazimo da ona ima svojstvo anti- S , iz toga odmah možemo zaključiti da druga čestica ima svojstvo S . Ako bi se ovdje radilo o trenutnom prijenosu informacije između dviju čestica, ono što je Einstein nazvao “sablasiim djelovanjem na daljinu”, tada bi se ta činjenica izravno protivila činjenici koja proizlazi iz drugog postulata Einsteinove STR, da se nikakva informacija između dvaju udaljenih – klasičnih, kao i kvantnih – objekata (čestica, tijela) ne može prenijeti brže od brzine svjetlosti. Međutim, u slučaju da nema nikakve izmjene informacija između dviju udaljenih kvantnih čestica, ne bi bilo nikakve proturječnosti sa STR, unatoč tome što među njima nedvojbeno postoji korelacija, što je prvi put ustanovljeno 1972. godine u poznatom eksperimentu Freedmana i Clausera⁹, a potom i u eksperimentu Aspecta, Graničera i Rogera izvedenim 1982. godine¹⁰, a i u više sličnih eksperimenata koje su poslije izveli razni neovisni timovi fizičara diljem svijeta.

⁴ Kvantnomehaničko svojstvo subatomske čestice, možemo ga samo neizravno i vrlo pojednostavnjeno usporediti s kutnom količinom gibanja (zamahom) u klasičnoj fizici makroskopskih tijela.

⁵ Svojstvo elektromagnetskih valova, napose svjetlosti, povezano s orijentacijom električnoga polja.

⁶ Energijsko stanje sustava dvaju elektrona u kojemu je ukupna vrijednost elektronskog spinskog kvantnog broja jednaka nuli.

⁷ Načelo da dva fermiona (čestice s polucjelobrojnim spinom, npr. elektroni) s jednakim kvantnim brojevima među koje spada i kvantni broj spina, ne mogu istodobno zaposjesti isto kvantno stanje; usp. V. Lopac, *Ibid.*, str. 181.

⁸ Oznaka za Planckovu konstantu, osnovnu konstantu kvantne fizike.

⁹ Stuart J. Freedman and John F. Clauser, *Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories*, Phys. Rev. Lett. 28 (1972), 938–941, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.28.938>

¹⁰ Alain Aspect, Philippe Grangier and Gerard Roger, *Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities*, Phys. Rev. Lett. 49 (91) (1982), str. 91–94.

Kako, dakle, objasniti takvo događanje u realiziranom misaonom pokusu, a da bude u skladu s mnogo puta provjerenim drugim postulatom STR, odnosno kako ga suvislo tumačiti u skladu s formalizmom kvantne teorije? Prema njenoj izvornoj kopenhagenskoj (statističkoj) interpretaciji¹¹, takvo ponašanje kvantnih objekata jest intrinzično svojstvo kvantne mehanike. Naime, mjerni uređaj u trenutku opažanja npr. položaja jedne čestice, međudjeluje s istom česticom, što uzrokuje istovremeno urušavanje¹² zajedničke valne funkcije na oba položaja, a to znači da i druga čestica trenutno poprimi komplementarno svojstvo koje nije imala sve do trenutka opažanja prve čestice, kao da trenutno “sazna” koje je svojstvo “odabrala” opažena prva čestica. Dakle, zaključak bi bio kao da mjerenje svojstva S prve čestice uzrokuje da druga čestica u istom trenutku biva “prisiljena” uzeti komplementarno svojstvo anti-S, unatoč tome što je od prve udaljena proizvoljno daleko, pa čak i milijunima kilometara. Dvije čestice koje su jednom u prošlosti bile zajedno – u istom atomskom odnosno nuklearnom stanju, koje je opisano zajedničkom valnom funkcijom dvočestičnog stanja – i nakon toga se razdvoje, nastavljaju čak i na proizvoljno velikoj udaljenosti održavati vrlo precizno definiranu fizikalnu vezu. Prilikom mjerenja jedne čestice dolazi do nelokalnog utjecaja na drugu česticu, bez obzira na udaljenost između njih. Kaže se da su one **kvantno spregnute**, odnosno da se na njima očituje tzv. **kvantna nelokalnost** ili **kvantna neseparabilnost**¹³.

Da bi se mogla detektirati kvantna spregnutost dviju čestica u svemiru (npr. kozmičkog gama-zračenja), uvjet koji mora biti ispunjen jest da obje čestice tijekom gibanja, na svom putu do detektora s ničim ne međudjeluju, a vjerojatnost za to je u stvarnosti zanemariva. Zbog toga je kvantna spregnutost mogla biti opažena samo u eksperimentima koji su provedeni u strogo kontroliranim laboratorijskim uvjetima¹⁴.

Iako klasični analogon kvantne spregnutosti ne postoji, budući da se fizika makroskopskih tijela zasniva na Newtonovoj racionalnoj mehanici, ipak i njemu su prigovarali da je definiranjem sile kao uzroka gibanja tijela zapravo uveo djelovanje na daljinu. Tek je Maxwelllovom teorijom uveden pojam (električnog i magnetskog) polja kao medija za širenje međudjelovanja brzinom svjetlosti, koja je u Einsteinovoj STR postulirana kao najveća moguća brzina gibanja tijela, odnosno prijenosa međudjelovanja i informacija na daljinu¹⁵. Ipak, u nekakvoj samo donekle zornoj analogiji možemo predočiti fenomen kvantnih nelokalnih korelacija s djelovanjem gravitacijske sile Mjeseca na pojavu plime i oseke. Naime, ponašanje zajedničke valne funkcije kvantnog sustava dviju čestica možemo usporediti sa Zemljinom morskom masom kao jedinstvenim sustavom. Opažač, koji na određenom području Zemljine površine koje je u tom trenutku okrenuto prema Mjesecu, opaža pojavu plime, kao posljedicu djelovanja gravitacijske sile Mjeseca na morsku masu na tom dijelu Zemaljske kugle, on zna da je istodobno na suprotnom kraju (najudaljenijem od

¹¹ Najraširenija interpretacija formalizma kvantne mehanike čiji su glavni zastupnici bili Niels Bohr i Werner Heisenberg.

¹² Urušavanje ili kolaps valne funkcije je pojam koji označava reduciranje (sažimanje) zajedničke valne funkcije koja opisuje superpoziciju dvaju ili više vlastitih stanja kvantnih objekata (čestica, sustava), u jedno vlastito stanje koje se opaža u eksperimentu; do toga dolazi upravo zbog interakcije kvantnog objekta s mjernim uređajem u trenutku opažanja.

¹³ Postojanje interakcija koje dopuštaju trenutačne ili “brže od svjetlosti” utjecaje između lokaliziranih dijelova proširenog (nelokalnog) sustava (dviju ili više subatomske čestice). Usp. Bernard D’Espagnat: *U potrazi za stvarnošću*, Zagreb, 2020., str. 254.

¹⁴ Nicolas Gisin, *Quantum nonlocality: how does nature do it?*, Science (2009), vol. 326, str. 1357–1358.

¹⁵ Poznata je Feynmanova osebujna misao da je “... poznavanje klasičnog elektromagnetskog polja koje djeluje lokalno na česticu nedovoljno za predviđanje kvantnomehaničkog ponašanja...”; te da je “... polje u fiziku uvedeno kao matematički alat za izbjegavanje ideje o djelovanju na daljinu”. Usp. Richard Feynman: *The Feynman Lectures on Physics*, vol. 2, Ch. 1, odjeljak 1–5: *What are the fields?*

Mjeseca) Zemaljske kugle također plima, kao posljedica zakona očuvanja morske mase. Možemo smatrati kao grubu aproksimaciju, da gravitacijska sila djeluje samo na morsku masu bližu Mjesecu, ali da su te dvije morske mase nelokalno korelirane budući su jedan jedinstveni sustav. Analogno tome, dvije kvantno spregnute čestice uvijek su vezane zajedničkom valnom funkcijom bez obzira na njihovu međusobnu udaljenost, pa u trenutku djelovanja na jednu od njih zajednička valna funkcija trenutno se “urušava”, odnosno javlja se istodobna (trenutna) nelokalna korelacija dviju čestica.

Bellova nejednakost

Irski fizičar John Stewart Bell (1928. – 1990.) formulirao je 1964. godine logičku formulaciju koja je postala poznata kao Bellova nejednakost. Ona se može dokazati pomoću argumenata iz matematičke teorije skupova. Ta nejednakost određuje gornju granicu korelacije između mjerenja u prostorno razdvojenim dijelovima prvotno istog fizikalnog sustava¹⁶. Ako je, naime, višekratno ponovljenim mjerenjima utvrđena korelacija između tih dijelova koja zadovoljava Bellovu nejednakost tada se radi o lokalnim korelacijama, kao što je npr. djelovanje sile na tijelo u klasičnoj (Newtonovoj) fizici korelirano s pomakom tijela. Za kvantne objekte, međutim, Bellova nejednakost je narušena, odnosno kvantni sustavi pokazuju prije opisane nelokalne korelacije, što je ustanovljeno vrlo sofisticiranim i precizno realiziranim eksperimentima (iako ne u svim). Tako je tijekom sedamdesetih godina prošlog stoljeća sedam istraživačkih grupa izvodilo testove Bellove nejednakosti mjereći komponente spina parova protona u singletnom stanju, odnosno polarizaciju parova niskoenergetskih fotona emitiranih pri prijelazu između dvaju energijskih stanja atoma žive, te visokoenergetskih fotona (gama-zraka) proizvedenih u anihilaciji elektrona i pozitrona. Od tih sedam eksperimenata, rezultati u njih pet su rezultirali narušenjem Bellove nejednakosti, drugim riječima bili su u skladu s kvantnom mehanikom¹⁷. U preostala dva eksperimenta, međutim, nije otkriven uzrok nesuglasja u rezultatima, kao što je, na primjer, mogla biti sistematska pogreška pri mjerenju koju može uzrokovati izbor pogrešne metode ili pogrešno izvođenje mjerenja. Godine 1982., prije spomenuti eksperiment s fotonima, koji je osmislila i izvela grupa fizičara rezultirao je pronalaskom maksimalnog narušenja Bellove nejednakosti koju su predložili Bohm i Aharonov¹⁸. Danas je pak, među znanstvenicima općenito prihvaćeno narušenje Bellove nejednakosti za kvantne sustave. Istini za volju, ipak treba spomenuti da rezultati spomenutog eksperimenta, osim tumačenja kvantnom nelokalnošću, dopuštaju i alternativna objašnjenja s pozicije lokalnog realizma, kao i činjenica da postoje znanstvenici koji imaju drugačija mišljenja¹⁹. Jedno od njih je mišljenje da bi se trebao redefinirati koncept signala, tako da se samo oni signali koji prenose korisne informacije, poput naredbi ili naputaka, mogu nazvati signalima, što u ovom pokusu nije slučaj. Tada bi, bez obzira na narušenje Bellove nejednakosti, bilo sačuvano načelo konačnog širenja signala brzinom svjetlosti, što je dobro poznati postulat STR.²⁰

¹⁶ Usp. Vjera Lopac: *Ibid.*, str. 23; Bernard D’Espagnat: *Ibid.*, str.235-245

¹⁷ Usp. Bernard D’Espagnat: *Ibid.*, str. 242.

¹⁸ Usp. Alain Aspect, Phillippe Grangier, Gerard Roger: *Ibid.*, str. 91–94. David Bohm, Yahir Aharonov, *Discussion of Experimental Proof for the Paradox of Einstein*, Rosen and Podolski Phys. Rev. 108 (1957), str. 1070–1076.

¹⁹ Marian Kupczynski: *Seventy Years of the EPR Paradox*, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0710/0710.3397.pdf> [24. 3. 2023.]; *Can we close the Bohr-Einstein quantum debate?*, Phil. Trans. Roy. Soc. A (2017), 375.

²⁰ Usp. Bernard D’Espagnat: *Ibid.*, str. 251.

Kao dobar kandidat za eksperiment provjere Bellove nejednakosti mogao bi poslužiti rijetki nuklearni događaj tzv. dvojni gama raspad metastabilnih stanja nekih jezgara (npr. Ag-109, La-139)²¹. U tom procesu atomska jezgra emitira dva fotona u različitim smjerovima koji kontinuirano dijele energiju prijelaza metastabilnog u konačno stabilno stanje. Koincidentnim²² mjerenjima polarizacija obaju fotona moglo bi se provjeriti je li za njih narušena Bellova nejednakost.

Zaključak

Prema rezultatima provedenih eksperimenata nelokalnost kvantne mehanike je prevladavajuće tumačenje EPR paradoksa. Međutim, kao što je prije spomenuto, postoji i protivno gledište, koje pored Einsteina, zastupaju pojedini znanstvenici i filozofi koji brane lokalni realizam. Spomenimo kao primjer poznatog filozofa znanosti, Karla Poppera²³, koji kaže da nije stvar u eksperimentalnoj potvrdi nekog prirodnog zakona, već u njegovom opovrgnuću. Dovoljno je, prema Popperu, izvesti samo jedan eksperiment rezultati kojeg mogu oboriti čitavu teoriju²⁴, što se već događalo u povijesnom razvoju znanstvenih ideja. Sjetimo se samo poznatog Michelson-Morleyevog pokusa²⁵ koji je oborio klasičnu teoriju etera i najavio rađanje nove relativističke odnosno kvantne paradigme u modernoj fizici. A u ovom slučaju, kao što je već spomenuto, u barem dva izvedena eksperimenta rezultati su zadovoljili Bellovu nejednakost, odnosno lokalnu korelaciju između udaljenih kvantnih objekata²⁶. Na sličnoj poziciji stoji i poznati matematički fizičar Roger Penrose, suvremenik i suradnik Stephena Hawkinga, koji smatra da je problem mjerenja u kvantnoj fizici povezan s prirodom smjera vremena²⁷. Naime, jednačbe fizike su invarijantne s obzirom na zamjenu smjera vremena odnosno predznaka (plus ili minus) vremenske varijable, tj. daju ista rješenja, dok je u termodinamičkim procesima, kao i u našem subjektivnom doživljaju fenomena vremena, da je njegov tijek jednosmjernan – od prošlosti prema budućnosti – čija je razdjelnica sadašnji trenutak. Fizičari za to imaju i poseban izraz: “strijela vremena”, koja je usmjerena prema budućnosti. Taj raskorak između termodinamičke jednosmjernosti protjecanja vremena i dvosmjernosti vremena u fizikalnim jednačbama još uvijek ostaje velika nepoznanica za teorijsku fiziku. S protjecanjem vremena usko je povezan i problem uzročnosti (kauzalnosti). Naime, svoju racionalnu mehaniku Newton je utemeljio na tri svoja zakona uvođenjem sile kao uzroka gibanja. Svako, dakle, međudjelovanje tijela, uzrokuje promjenu njegovog stanja gibanja; isto tako, odsutnost odnosno ravnoteža međudjelovanja uzrok je mirovanju ili jednolikom gibanju tijela. Determinizam klasične fizike bio bi nemoguć bez korelacije uzroka i posljedice. Newton je zapravo reducirao Aristotelov nauk o četiri uzroka²⁸ na samo jedan – djelatni uzrok (lat. *causa efficiens*), koji je on uveo pod pojmom **sile**. Kod prije spomenutih kvantnih mjerenja, međutim,

²¹ Ksenofont Ilakovac et al., *Search for double-photon decay of the Ag-109 metastable state at 88 keV*, Fizika 20 (1988), 1, str. 91–98; Roko Pešić, *Dvojni fotonski raspad u La-139*: magistarski rad, Zagreb, 1990.

²² istodobnim

²³ Karl Popper (1902. – 1994), austrijski filozof znanosti, zastupnik filozofije kritičkog racionalizma, protivne pozitivizmu bečke škole, koja smatra da se do istine ne može doći dokazivanjem, već samo otkrivanjem pogrešaka; vidi: Rječnik filozofskih pojmova <http://www.filozofija.org/>

²⁴ Usp. Ivan Supek: *Ibid.*, str. 18, 53.

²⁵ Pokus nazvan po američkim fizičarima A. Michelsonu i E. Morleyu koji su ga izveli 1887. godine s ciljem da dokažu postojanje etera, no rezultat pokusa bio je negativan, tj. definitivno je potvrdio da eter ne postoji.

²⁶ Usp. Bernard D’Espagnat: *Ibid.*, str. 242.

²⁷ Nikola Zovko: *Vrijeme u matematizaciji prirode*, Filozofska istraživanja 21 (2001), 2–3, pp. 286–287.

²⁸ Aristotel: *Ibid.*, Knjiga 2, str. 37.

utvrđena je nelokalna korelacija bez međudjelovanja. Pitanje je narušava li taj rezultat prije spomenuto temeljno spoznajno načelo uzročnosti? Ukoliko bi odgovor na ovo pitanje bio potvrđan, značilo bi da se neka promjena može dogoditi i bez uzroka, iz čega slijedi da se ona isto tako mogla i ne dogoditi (sjetimo se samo prvog Newtonovog zakona tromosti²⁹ iz kojega slijedi da bez djelovanja sile-uzroka nema ni promjene stanja gibanja). A to je u suprotnosti s drugim temeljnim spoznajnim načelom – načelom protuslovlja³⁰. Moguće je, međutim, i tumačenje prema kojemu se radi o pogrešnoj metodologiji u izvođenju kvantnog mjerenja, što zastupa već spomenuti kanadski teorijski fizičar Kupczynski³¹.

Zaključimo da još uvijek ne postoji opći konsenzus među fizičarima i filozofima znanosti s obzirom na tumačenje EPR paradoksa. I Einsteinova STR kao i kvantna teorija do sada su se pokazale kao izuzetno uspješne u teorijskom odnosno potvrđene s izuzetnom preciznošću u eksperimentalnom pogledu. Stoga kvantna neseparabilnost ostaje kao svojevrsni spoznajni misterij teorijske fizike, rješenje kojega se, prema Penroseovim slutnjama, možda krije u kvantnim fluktuacijama³² prostorvremena³³ na vrlo maloj subatomskejskoj skali, tzv. “kvantnoj pjeni”³⁴, gdje prestaju vrijediti poznati zakoni fizike, kao i makroskopska struktura prostorvremena. Moguće je, također, da postoji nekakav još neotkriveni nelokalni fizikalni mehanizam koji služi kao prijenosnik informacija između dvaju udaljenih kvantnih objekata.

Po mom mišljenju, u promišljanju ovog kvantnog fenomena korisno bi bilo njegovati interdisciplinarni pristup u kojem bi, osim fizičara, trebali sudjelovati također i stručnjaci iz znanosti koje su po svom području proučavanja srodne ili graniče s fundamentalnim fizikom, prvenstveno kozmologije i filozofije znanosti, pa eventualno i metafizike³⁵ odnosno teologije.

²⁹ “Tijelo (koje miruje ili se jednoliko giba) ostaje u stanju mirovanja ili jednolikog gibanja po pravcu, sve dok na njega ne djeluje sila.” Vjera Lopac: *Ibid.*, str. 195.

³⁰ “Što god jest, ne može ujedno i ne biti.” Stjepan Zimmermann: *Ibid.*, str. 182.

³¹ Vidi bilj. 18.

³² Kvantne fluktuacije su promjene iznosa energije u prostorvremenu što se tumači posljedicom Heisenbergovih načela neodređenosti energije i vremena; usp. Alain Connes et al.: *O prostoru i vremenu*, hrv. prijevod D. Hlad, MISL, Zagreb, 2013., str. 88, 164, 195.

³³ U teoriji relativnosti, proširenje pojma trodimenzijskoga prostora, tako što se uz tri prostorne koordinate uvodi i četvrta koordinata *ict*, gdje je *t* vrijeme, *c* brzina svjetlosti, a *i* imaginarna jedinica. Vidi: Vjera Lopac: *Ibid.*, str. 41.

³⁴ “Kvantna pjena” je hipotetski pojam koji je uveo američki teorijski fizičar John A. Wheeler (1911. – 2008.) da bi pokušao objasniti možebitno drugačiju (diskretnu, a ne kontinuiranu kao na makroskopskoj skali), “pjenoliku” strukturu prostorvremena na razini subatomskejskih čestica (tzv. Planckovoj ljestvici) koju, prema njemu, uzrokuju kvantne fluktuacije; usp. Alain Connes et al., *O prostoru i vremenu*, hrv. prijevod D. Hlad, MISL, Zagreb, 2013., str. 88, 164, 195.

³⁵ O mišljenju da je zadatak filozofije da pruži metafizičke temelje znanosti, vidi: Henrique Jales Ribeiro, *The End of Philosophy of Science and the Idea of Open Epistemologies*, *Philosophy International Journal* 4 (2021), 3, str. 1, 3; američki fizičar i filozof znanosti Henry Margenau (1901. – 1997.) je također mišljenja da u suvremenoj fizici ima metafizičkih elemenata odnosno da ih i treba biti, vidi: Henry Margenau: *Ibid.*, str. 139.